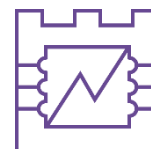




**Politechnika Krakowska**  
**im. Tadeusza Kościuszki**



**Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej**

**mgr inż. Natalia Radwan – Pragłowska**

**Streszczenie rozprawy doktorskiej**

**MODELOWANIE GENERATORÓW  
TARCZOWYCH WZBUDZANYCH MAGNESAMI  
TRWAŁYMI**

Promotor

*dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK*

Promotor pomocniczy

*dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK*

Kraków, 26.04.2021 r.

## 1. PRZEDMOWA

Wolnoobrotowe generatory o tradycyjnej konstrukcji charakteryzują się stosunkowo dużym ciężarem oraz znacznymi wymiarami promieniowymi, co często utrudnia ich zastosowanie. Uważa się, że wzbudzenie elektromagnetyczne może być zastąpione magnesami trwałymi. Rozwój inżynierii materiałów magnetycznych i produkcja wysokoenergetycznych magnesów trwałych nowej generacji z ziem rzadkich typu SmCo oraz NdFeB o bardzo dobrych parametrach, zapewniających możliwość wzbudzania pól magnetycznych porównywalnych z wytwarzanymi elektromagnetycznie spowodował, że generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi znalazły szerokie zastosowania.

Zastosowanie magnesów trwałych w układzie wzbudzenia maszyn synchronicznych umożliwia podwyższenie ich sprawności z uwagi na brak strat w obwodzie wzbudzenia w porównaniu z maszynami synchronicznymi z klasycznym wzbudzeniem elektromagnetycznym. Wydaje się jednak, że pomimo nadal trudnych do zastąpienia tradycyjnych rozwiązań maszyny ze strumieniem promieniowym pozostają nadal obszary, gdzie można poszukiwać rozwiązań nietypowych. Rozwiązania tarczowych generatorów synchronicznych wzbudzonych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym mogą być przykładem tych nietypowych konstrukcji, stąd też problematyka modelowania tej klasy maszyn jest istotnym zagadnieniem.

## 2. WPROWADZENIE

Zainteresowanie generatorami synchronicznymi, wzbudzonymi magnesami trwałymi, jest związane z ogólnoswiatowymi tendencjami wspomagania energetyki przy pomocy lokalnych siłowni bazujących na odnawialnych źródłach energii takich jak energia wody czy wiatru, w których generatory synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi znajdują często zastosowanie. Dla tych rozwiązań istnieją możliwości opracowania konstrukcji o bardzo dużej liczbie biegunów oraz stosunkowo niewielkich gabarytach. Temat rozprawy związany jest z poszukiwaniem rozwiązań konstrukcyjnych elektromechanicznych przetworników energii z magnesami trwałymi, dedykowanych dla tak zwanej „małej energetyki”. Należą do nich generatory wzbudzone magnesami trwałymi o radialnym polu magnetycznym jak również generatory tarczowe o osiowym polu magnetycznym.

Obiekt badań, którym jest generator o osiowym polu magnetycznym, wpisuje się w strategiczne kierunki badawcze prowadzone przez liczne jednostki badawcze, w tym także Katedrę Inżynierii Elektrycznej Politechniki Krakowskiej (w obszarze Energetyka i Środowisko – „Przyjazne dla środowiska systemy przetwarzania energii”). Praca skupia się na generatorach tarczowych spotykanych w opisach z literatury jako AFPM (Axial Flux Permanent Magnet).

Problematyka modelowania generatorów tarczowych z magnesami trwałymi została w pracy zrealizowana poprzez opracowanie trzech typów modeli: matematycznego, polowego oraz fizycznego stanowiska laboratoryjnego. Porównanie uzyskanych rezultatów będzie stanowić podstawę metodyczną do dalszych prac nad udoskonaleniem konstrukcji tego typu maszyn.

Rozważania zawarte w pracy mają na celu pokazanie możliwości analiz efektów interakcji wyższych harmonicznym rozkładu pola magnetycznego dla generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi, analogicznie jak dla klasycznych maszyn. Na podstawie szczegółowego opisu matematycznego, dla tej klasy maszyn, zostały utworzone modele uproszczone, których użyteczność jest bardzo istotna z punktu widzenia eksploatacyjnego.

Ze względu na fakt, iż geometria obwodu magnetycznego w generatorach tarczowych o strumieniu osiowym, wzbudzanych magnesami trwałymi, różni się od maszyn klasycznych o magnesowaniu promieniowym, relacje opisujące rozkład indukcji magnetycznej, prowadzące w konsekwencji do wyznaczenia sił elektromotorycznych (EMF) indukowanych w uzwojeniach dla tego typu maszyn, muszą zostać zmodyfikowane.

Temat rozprawy oraz motywacja jej podjęcia, związane są z faktem, iż o ile w zakresie klasycznych rozwiązań maszyn elektrycznych trudno znaleźć nieprzebadane obszary, to w przypadku maszyn o magnesowaniu osiowym jest jeszcze pewien obszar tematyczny, który można uzupełnić wprowadzając nowoczesne metody badań, bazujące na analizach polowych 3D oraz specjalizowanych modelach obwodowych. Badania w tym zakresie mogą być przydatne zarówno dla konstruktorów jak również osób zajmujących się eksploatacją i diagnostyką maszyn elektrycznych.

### 3. CEL I ZAKRES PRACY

Jak wynika z przedstawionego w pracy stanu wiedzy o teorii, projektowaniu i konstrukcjach generatorów AFPM, istnieje możliwość poszerzenia wiedzy w zakresie modelowania, projektowania i praktycznej realizacji takich generatorów. W związku z tym jako cel pracy postawiono:

- Zaproponowanie wielowariantowych obwodowych modeli generatorów, wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznego przestrzennego rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń,
- Doświadczalną weryfikację tych modeli poprzez zbudowanie prototypów i badania laboratoryjne,
- Opracowanie metodyki tworzenia modeli matematycznych i ich weryfikacji celem udoskonalenia procesu projektowania AFPMG.

Realizacja postawionego celu pracy związana jest z udowodnieniem tezy:

***Istnieje możliwość utworzenia obwodowych modeli generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznego przestrzennego rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń.***

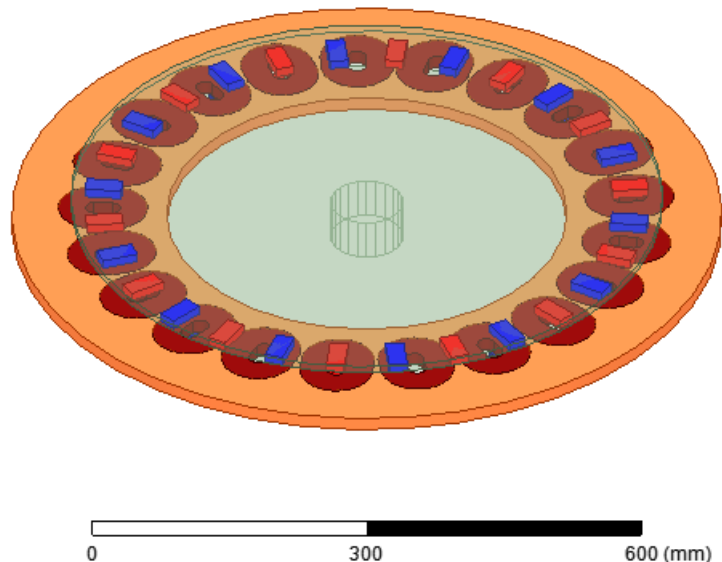
Całość rozprawy doktorskiej składa się z wykazu użytych oznaczeń, ośmiu rozdziałów, dodatku oraz spisu literatury. Chronologicznie postępowanie polegało na opracowaniu metodyki wyznaczania rozkładu pola w obwodzie magnetycznym 3-fazowego generatora z osiowym strumieniem magnesów trwałych, umieszczonych na wirniku. Dzięki temu sformułowano analityczny zapis zależności, w celu określenia indukcyjności oraz strumieni skojarzonych uzwojeń. Pozwoliło to w dalszej kolejności na ogólny zapis równań modeli matematycznych generatorów.

Szczególne uwagi zostały zwrócone na takie przetworzenie równań modelu matematycznego, aby było możliwe jakościowe określenie własności generatorów w stanach ustalonych już na podstawie równań, nawet bez konieczności ich ilościowego rozwiązywania. Zastosowano w tym celu teorię równań różniczkowych o okresowo zmiennych współczynnikach dającą możliwość określenia widm Fouriera prądów uzwojeń i momentu elektromagnetycznego w ustalonym stanie pracy. Wyniki analiz analitycznych zweryfikowano przez obliczenia numeryczne FEM – 3D oraz badania laboratoryjne dla stworzonych prototypów maszyn.

#### 4. ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE GENERATORÓW WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI O STRUMIENIU OSIOWYM

Rozwiązania konstrukcyjne dla generatorów o strumieniu osiowym posiadają relatywnie prostą konstrukcję jednakże różnorodności ich wykonania sprawiła, iż dla tej klasy maszyn istnieją obszary, dla których można przeprowadzić rozważania będące ciekawym uzupełnieniem klasycznych aspektów modelowania maszyn elektrycznych.

W pracy zawarto rozważania dotyczące polepszenia wybranych parametrów AFPMG, w oparciu o analizy polowe, wykonane w środowisku symulacyjnym ANSYS Maxwell, na podstawie których wybrano konstrukcje generatorów do dalszych rozważań.



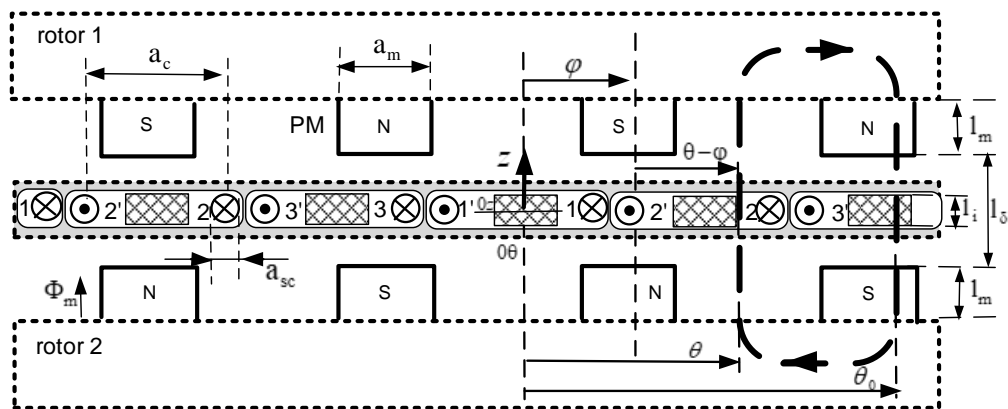
Rys. 1. Model generatora AFPM w pakiecie ANSYS Maxwell

Autorka szerzej koncentruje się na reprezentatywnym przypadku generatorów tarczowych (Rys. 1.), posiadających nieruchomy stojan i dwie tarcze wirnika. Do dalszych analiz wybrano konstrukcje stojana bezrdzeniowego i z rdzeniami umieszczonymi wewnątrz cewek, przy nienachodzących uzwojeniach. Przeprowadzone w pracy analizy polowe miały na celu pokazanie wpływu wybranych rozwiązań konstrukcyjnych na polepszenie parametrów eksploatacyjnych dla wybranego typu z szeregu rozpatrywanych generatorów.

## 5. OBWODOWE MODELE MATEMATYCZNE 3-FAZOWYCH GENERATORÓW WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI O STRUMIENIU OSIOWYM

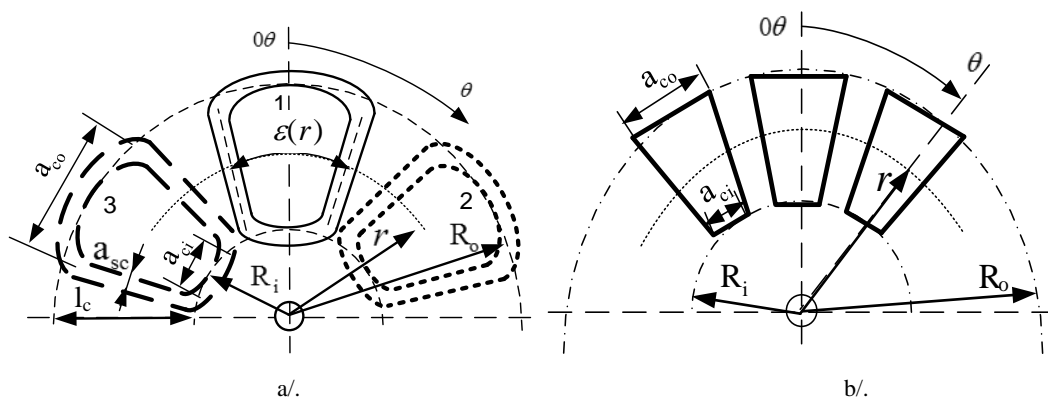
Rozpatrywane w pracy modele odnoszą się do konstrukcji generatora AFPMG z nienachodzącymi uzwojeniami. W pracy założono przypadki konstrukcji stojana bezrdzeniowego i stojana z żelaznymi rdzeniami, umieszczonymi wewnątrz cewek. Rozważono również przypadek skośnego ułożenia magnesów trwałych na tarczach wirnika. Poniżej zamieszczono schematyczne topologie maszyn.

Ilustrację metodologii tworzenia analitycznego opisu rozkładu indukcji w szczelinie powietrznej, wykonano dla modelu z rdzeniami, przedstawionego w układzie współrzędnych z Rys. 2 i Rys. 3. Bazując na tym modelu można wprowadzić również dowolne inne kształty obwodu magnetycznego.



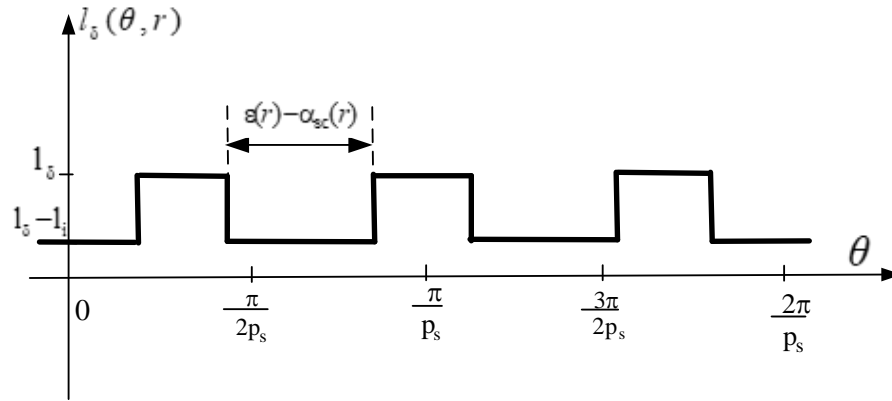
Rys. 2. Model dla analiz rozkładu indukcji magnetycznej AFPMG z rdzeniami w stojanie

Na Rys. 3 przedstawiono przykładowe rozłożenie uzwojeń i umieszczenie żelaznych rdzeni wewnątrz cewek.



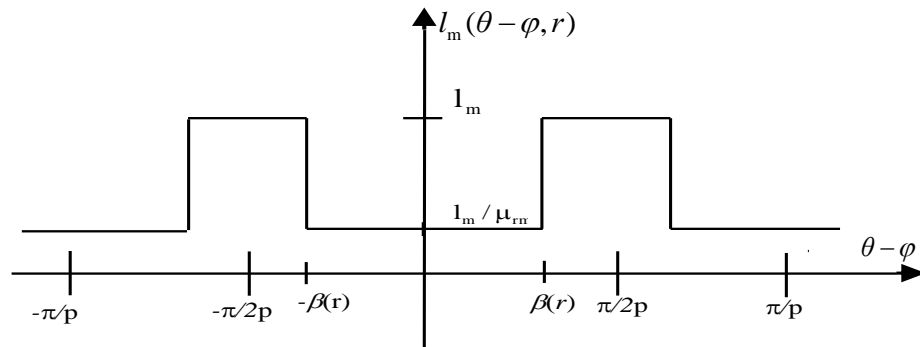
Rys. 3. a/. Zakładane ułożenie uzwojeń, b/. rozkład żelaznych rdzeni w środku cewek

Funkcja długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie powietrznej  $l_{\delta}(\theta, r)$  dla generatora bezrdzeniowego jest stała, natomiast dla generatora z rdzeniami jest funkcją współrzędnej  $\theta$ . W ogólnym przypadku może być przedstawiona zgodnie z Rys. 4.



Rys. 4. Zastępcza funkcja długości linii sił pola magnetycznego w szczelinie

Z kolei funkcję długości linii sił pola magnetycznego w magnesie  $l_m(\theta - \varphi, r)$  można przedstawić następująco:



Rys. 5. Zastępcza funkcja długości linii sił pola magnetycznego w magnesie

Model rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej generatora AFPM jest funkcją czterech zmiennych (zależnych od składowej  $z$ , położenia względem stojana  $\theta$ , kąta położenia wirnika  $\varphi$  i położenia radialnego  $R_1 \leq r \leq R_o$ ). Przyjęto, że ogólna formuła, opisująca rozkład indukcji magnetycznej jest uproszczona i rozważana jest tylko dla składowej  $z = 0$ . To oznacza, że:

$$B_{\delta}(z, \theta, \varphi, r) = B_m(z, \theta, \varphi, r) = B(z = 0, \theta, \varphi, r) \quad (1)$$

Stosując prawo bezźródłowości pola magnetycznego i przyjętej liniowości obwodu magnetycznego otrzymano formuły opisujące rozkład pola magnetycznego, dobrze znane z klasycznych rozważań.

$$B(z=0, \theta, \varphi, r) = B(\theta, \varphi, r) = B_{\Theta}(\theta, r) + B_{\text{PM}}(\theta - \varphi, r), \quad (2)$$

gdzie:

$B_{\Theta}(\theta, r)$  - składowa osiowa rozkładu indukcji powstałej od prądów uzwojeń (sił magnetomotorycznych uzwojeń SMM),

$B_{\text{PM}}(\theta - \varphi, r)$  - składowa osiowa indukcji pochodząca od magnesów.

Przyjmując oznaczenie  $l'_m(\theta - \varphi, r) = \frac{l_m(\theta - \varphi, r)}{\mu_{\text{rm}}}$  i definiując funkcję permeancji jednostkowej:

$$\lambda(\theta, \varphi, r) = \frac{\mu_0}{l_s(\theta, r) + l'_m(\theta - \varphi, r)} \quad (3)$$

oraz definiując funkcję przepływu (SMM- siły magnetomotorycznej) uzwojeń, jako:

$$\Theta_s(\theta, r) = \int a_s(\theta, r) d\theta \quad \int_{\theta}^{\theta+2\pi} \Theta_s(\theta, r) d\theta \equiv 0 \quad (4)$$

składowe osiowe indukcji można zapisać w następującej postaci:

$$B_{\Theta}(\theta, r) = \lambda(\theta, r) \left\{ \Theta_s(\theta, r) - \frac{\int_{\theta}^{\theta+2\pi} \lambda(\theta', r) \cdot \Theta_s(\theta', r) d\theta'}{\int_{\theta}^{\theta+2\pi} \lambda(\theta', r) d\theta'} \right\} \quad (5)$$

$$B_{\text{PM}}(\theta, \varphi, r) = \frac{\lambda(\theta, \varphi, r)}{\lambda_{\text{ref}}(r)} \left\{ B_m(\theta - \varphi, r) - \frac{\int_{\theta}^{\theta+2\pi} \lambda(\theta', \varphi, r) \cdot B_m(\theta' - \varphi, r) d\theta'}{\int_{\theta}^{\theta+2\pi} \lambda(\theta', \varphi, r) d\theta'} \right\} \quad (6)$$

gdzie:

$\lambda_{\text{ref}}(r) = \lambda(0, 0, r)$  - jest wielkością odniesienia dla funkcji permeancji,

$B_m(\theta - \varphi, r)$  - jest rozkładem indukcji wytworzony przez magnesy trwale dla maszyny bezrdzeniowej.

Tak przygotowane rozkłady indukcji pozwoliły w dalszej kolejności na wyznaczenie prezentowanych w pracy, najważniejszych parametrów dla różnych wariantów AFPMG (w szczególności indukcyjności i strumienie skojarzone uzwojeń).



## 6. MODELE MATEMATYCZNE 3-FAZOWYCH GENERATORÓW WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI DLA STANU USTALONEGO

W celu zapisu równań modeli matematycznych wykorzystano formalizm Lagrange'a, definiując zmodyfikowaną funkcję ko-energii oraz charakterystyki uzwojeń. Szczególna uwaga zwrócona została także na takie przetworzenie równań modeli maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi, aby było możliwe jakościowe określenie właściwości maszyny w stanach ustalonych już na podstawie równań, bez konieczności ich ilościowego rozwiązywania. Pomocna w tym celu była transformacja równań modelu do składowych symetrycznych. Zastosowano teorię równań różniczkowych liniowych o okresowo zmiennych współczynnikach, która pozwoliła na precyzyjne określenie widm Fouriera prądów uzwojeń (zarówno ilościowo, jak i jakościowo) oraz momentu elektromagnetycznego (jakościowo) w ustalonych stanach pracy. Stan ustalony maszyny jest rozważany, gdy prędkość kątowna wirnika jest stała tzn.  $\omega = \Omega$  i wtedy  $\varphi = \Omega \cdot t + \varphi_0$ . Wartość kąta  $\varphi_0$  jest powiązana z obciążeniem generatora. Jeżeli dla stanu ustalonego jest spełniona relacja:  $\omega_0 = p\Omega$ , wówczas wektor strumieni skojarzonych staje się okresowy i możemy przyjąć rozwiązanie dla równań w postaci:

$$\mathbf{i}^s = \sum_v \mathbf{I}_v^s \cdot e^{jv\Omega t}; \quad \mathbf{I}_v^s = [\underline{I}_v^{s0} \quad \underline{I}_v^{s1} \quad \underline{I}_v^{s2}]^T \quad (7)$$

Rozwiązania (7) spełniają, zgodnie z metodą bilansu harmonicznym (ang. Harmonic Balance Method - HBM), nieskończenie wymiarowy układ równań algebraicznych:

$$\begin{aligned} & \text{diag} \begin{bmatrix} \vdots \\ j3p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ j p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ -j p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ -j3p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \text{diag} \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{L}^s + \mathbf{L}_L^s \\ \mathbf{L}^s + \mathbf{L}_L^s \\ \mathbf{L}^s + \mathbf{L}_L^s \\ \mathbf{L}^s + \mathbf{L}_L^s \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{I}_{3p}^s \\ \mathbf{I}_p^s \\ \mathbf{I}_{-p}^s \\ \mathbf{I}_{-3p}^s \\ \vdots \end{bmatrix} + \text{diag} \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_L^s \\ \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_L^s \\ \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_L^s \\ \mathbf{R}_s + \mathbf{R}_L^s \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{I}_{3p}^s \\ \mathbf{I}_p^s \\ \mathbf{I}_{-p}^s \\ \mathbf{I}_{-3p}^s \\ \vdots \end{bmatrix} = \\ & = \begin{bmatrix} \vdots \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{E}_1^s \\ \mathbf{E}_{-1}^s \\ \mathbf{0} \\ \vdots \end{bmatrix} - \text{diag} \begin{bmatrix} \vdots \\ j3p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ j p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ -j p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ -j3p\Omega \mathbf{E}_{(3 \times 3)} \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Psi_{3p}^s \\ \Psi_p^s \\ \Psi_{-p}^s \\ \Psi_{-3p}^s \\ \vdots \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

Z technicznego punktu widzenia, ograniczenie liczby równań wynika z liczby uwzględnianych harmoniczných prądów stojana. Używając HBM, formułę opisującą moment elektromagnetyczny można przedstawić następująco:

$$T_{em} = -\text{Im} \left\{ \sum_{k=0, \pm 1, \pm 2, \dots} \left[ \dots \mathbf{I}_{3p}^s \quad \mathbf{I}_p^s \quad \mathbf{I}_{-p}^s \quad \dots \right] \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ (2pk + 3p) \cdot \Psi_{2pk+3p}^s \\ (2pk + p) \cdot \Psi_{2pk+p}^s \\ (2pk - p) \cdot \Psi_{2pk-p}^s \\ \vdots \end{bmatrix} \cdot e^{j2pk\Omega t} \right\} \quad (9)$$

Przedstawione podejście pozwala na użycie metody HBM do śledzenia interakcji harmoniczných przestrzenných dla praktycznie każdej konstrukcji generatora wzbudzanego magnesami trwałymi.

Analizując postać formuły (9) udowodniono, że w przypadku pełnej symetrii wewnętrznej i zewnętrznej generatora, w momencie elektromagnetycznym występują komponenty o pulsacjach rzędu  $6p\Omega$ , podczas gdy w ogólnym przypadku, zgodnie z formułą (9) pojawiały się dodatkowe pulsacje będące wielokrotnością  $2p\Omega$ .

Zaprezentowane modele interakcji harmoniczných przestrzenných, jak również uproszczone struktury modeli miały na celu nawiązania do klasycznych modeli maszyn elektrycznych dla których przeważnie zakłada się występowania jedynie podstawowych harmoniczných rozkładu pola magnetycznego oraz symetrii wewnętrznej i zewnętrznej maszyny. Użycie modeli uproszczonych pozwoliło również na analizy pracy generatora pracującego przy obciążeniu poprzez prostownik diodowy mostkowy.

## 7. WYNIKI ANALIZ POŁOWYCH (FEM 3-D) I OBLICZEŃ ANALITYCZNYCH

Rozważania dotyczące porównania analiz polowych, wykonanych przy użyciu metody elementów skończonych oraz obliczeń analitycznych, doprowadziły do przedstawienia rozkładu indukcji magnetycznej pochodzącej od magnesów trwałych, w środku szczeliny powietrznej, analizy indukowanych SEM w uzwojeniach generatora AFPM, prądów uzwojeń generatora oraz momentów elektromagnetycznego i zaczepowego. Porównano cztery wybrane konstrukcje AFPMG, których szczegółowe wymiary zamieszczono poniżej (Tabela 1):

Tab. 1. Dane konstrukcyjne AFPMG

---

### Parametry oraz wymiary magnesów trwałych generatora AFPM

- Typ magnesów: N40; Wymiary pojedynczego magnesu: 10x18x40 mm
- $B_r = 1.2$  T;  $H_c = 899$  kA/m;  $\mu_m = 1.07$ ;
- $\beta(r_s) = 0.0290$  rad;  $a_m = 18$  mm;  $l_m = 10$  mm
- Liczba magnesów (na jednej tarczy wirnika): 28;  $p = 14$ ;
- $l_c = 40$  mm – dla konstrukcji z prostymi magnesami (G1 i G3);
- $l_c = 70$  mm – dla magnesów skośnych (podwójnych) efektywna długość magnesu skośnego (G2 i G4)

---

### Budowa stojana generatora

- $R_i = 270$  mm;  $R_o = 310$  mm;  $r_s = 290$  mm;
  - $l'_c = 40$  mm;  $a_c = 50$  mm;  $a_{sc} = 30$  mm
  - $l_\delta = 26$  mm;
  - $l_i = 15$  mm – dla konstrukcji rdzeniowej stojana
  - $w_s = 980$
  - $R_s = 2 \Omega$
  - $\alpha_{sc}(r_s) = 0.1034$  rad
  - $\varepsilon(r_s) = 0.1517$  rad
  - $p_s = 7$
-

Do oceny poprawności obliczeń analitycznych, przeprowadzone zostały analizy polowe, z wykorzystaniem pakietu ANSYS - Maxwell (FEM – 3D). Poniżej w Tabeli 2 i 3 znajdują się porównanie wybranych wyników dla analiz polowych i obliczeń analitycznych.

Tab. 2. Porównanie wyników – współczynnik THD i RMS napięcia

AFPMG		THD <sub>E</sub>		E <sub>G ph(RMS)</sub>	
		Analizy polowe	Obliczenia analityczne	Analizy polowe	Obliczenia analityczne
G1	<i>Magnesy proste; stojan bezrdzeniowy</i>	5.72 %	6.06 %	65.4 V	61.3 V
G2	<i>Magnesy skośne; stojan bezrdzeniowy</i>	1.78 %	2.02 %	95.6 V	101.5 V
G3	<i>Magnesy proste; stojan z rdzeniami</i>	14.83 %	5.99 %	95.5 V	101.3 V
G4	<i>Magnesy skośne; stojan z rdzeniami</i>	3.54 %	1.28 %	133.3 V	143.4 V

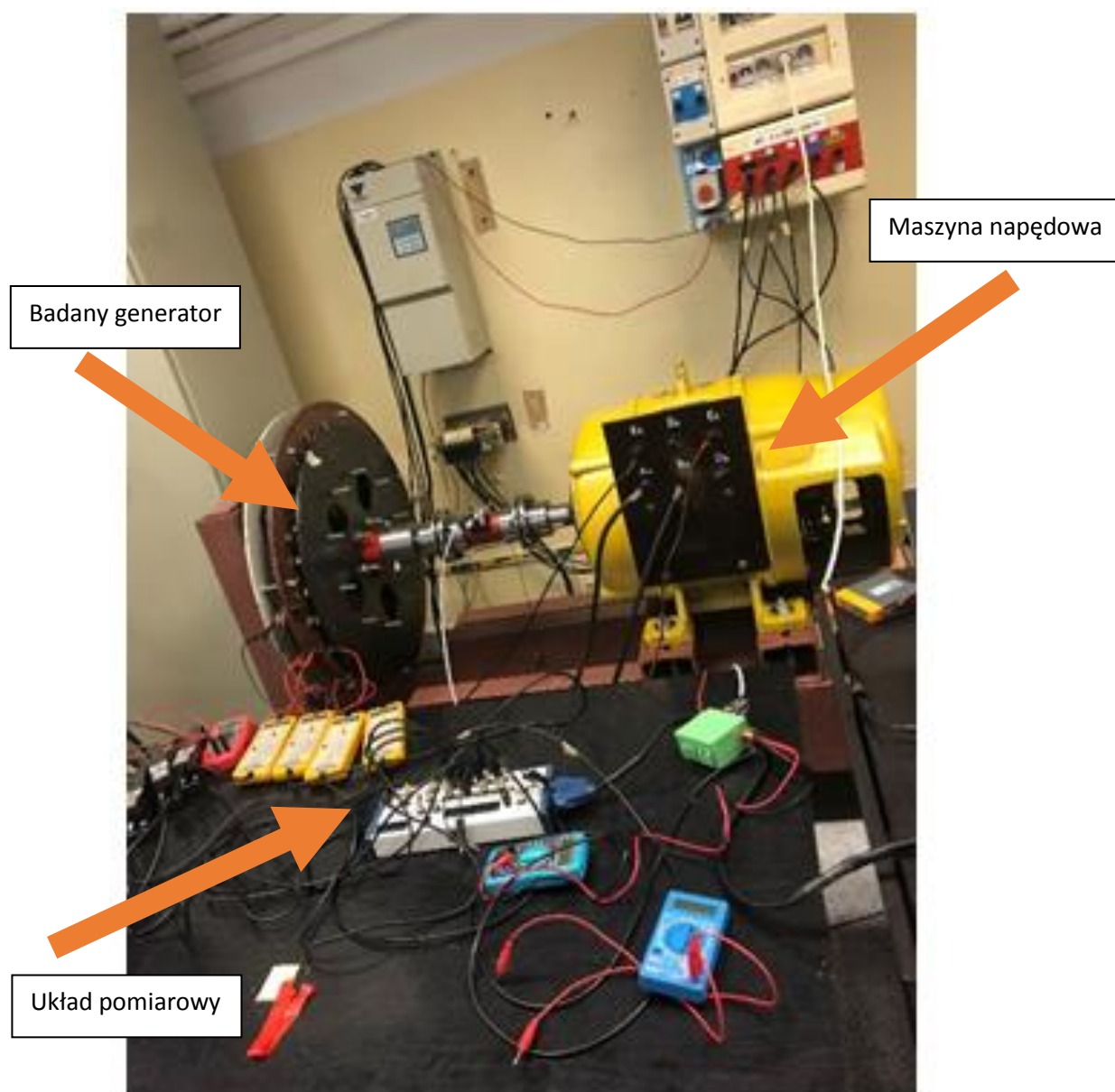
Tab. 3. Porównanie wyników – współczynnik THD i RMS prądu

AFPMG		THD <sub>I</sub>		I <sub>G(RMS)</sub>	
		Analizy polowe	Obliczenia analityczne	Analizy polowe	Obliczenia analityczne
G1	<i>Magnesy proste; stojan bezrdzeniowy</i>	0.49 %	0.16 %	1.6 A	1.65 A
G2	<i>Magnesy skośne; stojan bezrdzeniowy</i>	0.08 %	0.03 %	2.55 A	2.42 A
G3	<i>Magnesy proste; stojan z rdzeniami</i>	0.8 %	1.67 %	2.3 A	2.29 A
G4	<i>Magnesy skośne; stojan z rdzeniami</i>	0.46 %	1.03 %	3.66 A	3.52 A

## 8. BADANIA LABORATORYJNE I WERYFIKACJA MODELI

Weryfikacja przedstawionych modeli generatora z magnesami trwałymi, została dokonana poprzez analizę badań laboratoryjnych. Pomiary zostały porównane z obliczeniami analitycznymi i polowymi, dla generatora o założonych konstrukcjach stojana oraz wirnika.

Widok stanowiska pomiarowego z laboratorium zamieszczono poniżej. W skład zestawu wchodził: eksperymentalny generator sprzęgnięty przez momentomierz z napędową maszyną prądu stałego. Pomiary wykonano dla różnych obciążeń rezystancyjnych oraz obciążenia za pomocą układu mostka prostowniczego.



Rys. 7. Stanowisko laboratoryjne

Należy podkreślić, że tam gdzie były rozbieżności rezultatów uzyskanych na podstawie modeli analitycznych w stosunku do pomiarów, również nie uzyskiwano zadawalających wyników używając modeli polowych. Wybrane dane zawarto w tabelach 4 i 5.

Tab. 4. Porównanie wyników analiz polowych i testów laboratoryjnych – SEM

AFPMG		THD <sub>E</sub>		E <sub>G (RMS)</sub>	
		Analizy analityczne	Pomiary	Analizy analityczne	Pomiary
G1	<i>Magnesy proste; stojan bezrdzeniowy</i>	6.06 %	8.46 %	61.3 V	62.6 V
G2	<i>Magnesy skośne; stojan bezrdzeniowy</i>	2.02 %	2.22 %	101.5 V	105.1 V
G3	<i>Magnesy proste; stojan z rdzeniami</i>	5.99 %	7.27 %	101.3 V	95.8 V
G4	<i>Magnesy skośne; stojan z rdzeniami</i>	1.28 %	1.92 %	143.4 V	140.9 V

Tab. 5. Porównanie wyników analiz polowych i testów laboratoryjnych – prądy uzwojeń

AFPMG		THD <sub>I</sub>		I <sub>G (RMS)</sub>	
		Obliczenia analityczne	Pomiary	Obliczenia analityczne	Pomiary
G1	<i>Magnesy proste; stojan bezrdzeniowy</i>	0.16 %	0.23 %	1.65 A	1.39 A
G2	<i>Magnesy skośne; stojan bezrdzeniowy</i>	0.03 %	0.07 %	2.42 A	2.46 A
G3	<i>Magnesy proste; stojan z rdzeniami</i>	1.67 %	1.95 %	2.29 A	2.23 A
G4	<i>Magnesy skośne; stojan z rdzeniami</i>	1.03 %	0.21 %	3.52 A	3.43 A

## 9. PODSUMOWANIA I WNIOSKI

W pracy przedstawiono metodykę modelowania i wyniki badań trzech modeli generatorów tarczowych: model matematyczny (obwodowy), polowy i laboratoryjny. Wykonano analizy porównawcze, weryfikujące poprawność wykonanych obliczeń numerycznych i symulacyjnych. Ogólnie można stwierdzić, że rezultaty zawarte w pracy potwierdziły zadowalającą zgodność uzyskanych wyników z poszczególnymi modelami.

Przeprowadzone obliczenia analityczne, analizy polowe i badania laboratoryjne, potwierdziły, iż umieszczenie żelaznych rdzeni wewnątrz uzwojeń stojana, spowodowało zwiększenie otrzymywanej mocy, przy jednoczesnym powstawaniu momentów zaczepowych i pulsacji momentu. Dla tego rozwiązania została potwierdzona zgodność utworzonych modeli. Natomiast dla praktycznych rozwiązań (z technologicznego punktu widzenia) jest to wariant nie do przyjęcia, ze względu na trudności precyzyjnego ustawienia równomierności szczelin powietrznych oraz występujących bardzo dużych poziomów drgań związanych z momentami zaczepowymi.

Przedstawiona w rozprawie teza, dotycząca modelowania interakcji harmonicznym przestrzennym w maszynach tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi, została udowodniona. Jako reprezentatywną wybrano klasę trójfazowych generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi o symetrycznej budowie, co nie ogranicza jednak możliwości kreowania modeli z użyciem przedstawionej metodyki dla przypadków maszyn z niesymetriasami wewnętrznymi uzwojeń oraz obwodu magnetycznego.

W pracy, w większości przypadków (dla następujących wielkości: SEM, prądy, napięcia, moce, wartość średnia momentu elektromagnetycznego), uzyskano zbieżności rezultatów obliczeniowych z pomiarowymi na poziomie ok. 10%, co można uznać za wynik zadowalający. Rezultat ten potwierdza przyjęte wstępnie założenie, że opracowane obwodowe modele generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi są wystarczająco dokładne i mogą być przydatne do analizy różnych zagadnień eksploatacyjnych oraz badań ich właściwości w końcowych etapach procesu projektowania. Główną przyczyną pewnych rozbieżności wyników jest niedokładność i nieprecyzyjność wykonania modelu fizycznego, który cechował się pewnymi asymetriasami. Wynikało to między innymi z powstawania bardzo dużych sił

przyciągania magnesów uniemożliwiających ustawienie równomiernej na obwodzie szczeliny powietrznej.

Przedstawiona praca nie wyczerpuje obszernego zagadnienia modelowania maszyn tarczowych wzbudzonych magnesami trwałymi w ujęciu obwodowym. Analityczny opis parametrów maszyn przedstawiony w pracy, może zostać również zastąpiony obliczeniami polowymi. Należy wówczas dokonać aproksymacji wyników tak, aby można było uzyskać stosowne rozkłady funkcji ko-energii oraz charakterystyk uzwojeń umożliwiające w dalszej kolejności wykorzystanie metody bilansu harmonicznego do analiz stanu ustalonego. Takie podejście umożliwia zastosowanie opracowanej metodyki do śledzenia wzajemnych interakcji harmonicznego przestrzennych dla praktycznie każdego przypadku rozwiązania konstrukcyjnego maszyny wzbudzonej magnesami trwałymi.

Za najbardziej istotne i ważne rezultaty pracy dotyczące modelowania generatorów tarczowych z magnesami trwałymi można uznać:

- Analityczny opis rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej,
- zapis funkcji permeancji jednostkowej,
- zapis funkcji ko-energii,
- opis charakterystyk uzwojeń,
- opracowanie modeli matematycznych o różnym poziomie uszczegółowienia,
- zapis równań modeli matematycznych dla 3-fazowego generatora, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznego przestrzennych w przebiegach prądów uzwojeń i momencie elektromagnetycznym,
- zastosowanie metody bilansu harmonicznego do analiz stanu ustalonego 3-fazowego generatora tarczowego wzbudzanego magnesami trwałymi,
- otrzymanie dobrych zbieżności obliczeń analitycznych z wynikami pomiarów.

*Notatka Radwan - 12/2015*